

兰州重离子加速器冷却储存环主环 加速过程的束流反馈

张文志^{1,2}, 景春国¹, 杨晓东², 夏佳文², 魏宝文²

(1. 东北大学 秦皇岛分校, 河北 秦皇岛 066004;

2. 中国科学院 近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要:正在建设中的兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)主环用于束流的加速。在加速过程中,为了保证束流的谐振加速,须准备2个束流反馈环(相位反馈环和束流径向位置反馈环)来保证主导磁场与高频频率的同步。本文基于Laplace变换及数值计算结果,分析了束流反馈环对同步加速器中束流动力学行为的影响。

关键词:同步加速;高频控制;束流反馈

中图分类号:TL501

文献标识码:A

文章编号:1000-6931(2006)05-0620-05

Beam Feedback Loops of RF Acceleration System of Heavy Ion Research Facility at Lanzhou-Cooler Storage Ring/Main Ring

ZHANG Wen-zhi^{1,2}, JING Chun-guo¹, YANG Xiao-dong²,
XIA Jia-wen², WEI Bao-wen²

(1. *Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China;*

2. *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: Heavy ion research facility at Lanzhou-cooler storage ring (HIRFL-CSR) is being constructed. It consists of a main ring (CSRm) and an experimental ring (CSRe). The aim of the main ring is to accelerate the heavy ion to high energy. For synchronization between bending magnet field and RF frequency during acceleration process, two beam feedback loops for the frequency control are needed. One is the phase loop and the other is the radial position loop. The effects of these loops on the beam dynamics in the synchrotron are analysed on the basis of Laplace transformation and some numerical calculations.

Key words: synchronous acceleration; RF control; beam feedback

兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)主环(CSR_m)设计为将 10~50 MeV/u 的注入束流加速到 400~900 MeV/u (¹²C⁶⁺, 900 MeV/u; ²³⁸U⁷²⁺, 400 MeV/u)。对于重离子同步加速器,由于束流注入能量较低,而所设计的能量指标已到了较高的相对论能区,其高频系统,即低电平电子学部分、高电平功率放大器以及高频腔体均须有较大的频率调谐范围。高频系统的主振荡器的输出频率在整个加速过程中须严格地与粒子的回旋频率保持一致,否则,束流的径向位置将与中心轨道偏离而最终损失。HIRFL-CSR 主环高频系统采用直接数字信号合成器(DDS)作为主振荡器,其精度可达到 10⁻⁷。在加速过程中,与主导偏转磁场一一对应的高频频率预置于存储器中,从存储器中读出后加于 DDS 上。必然存在的频率调谐噪声、元器件的非线性、磁场测量的误差以及线路中的其它干扰信号源等均将导致 RF 频率的误差而使高频频率与主导磁场之间失去同步关系。为使加速过程中粒子始终能够得到同步加速,解决的方法是增加束流反馈来抑制因频率偏差(相对于主导二极磁场)而造成的束流轨道偏离,即频率偏差造成束流中心轨道的径向偏离由束流位置探测器给出信号,用该信号去校正高频频率,使其与磁场同步。

1 HIRFL-CSR 主环及其高频加速系统

CSR 由主环和实验环组成。主环用于制备高流强、高品质、高能量的重离子束,实验环用于放射性次级束的内靶实验以及高离化态的原子物理实验。主环的主要参数列于表 1。主环周长为 161.2 m,呈对称结构。高频加速腔

安装于长直线节,安装长度 2.6 m,频率调节范围 0.25~1.7 MHz,对应注入能量 10 MeV/u 及最大引出能量 900 MeV/u。推挽式高频功率放大器最大输出功率为 25 kW,设计为脉冲运行模式,其平均输出功率为 5 kW,最大峰值电压为 8.2 kV。另一长直线节安装电子冷却装置。表 2 列出高频加速腔系统的主要参数。

高频腔采用铁氧体加载的单间隙四分之一波长线型谐振腔^[1]。通过改变绕在铁氧上的直流偏磁电流线圈的电流,即改变其磁导率,从而改变腔体的谐振频率。加速过程中,3 个主要参数,高频频率、加速电压及偏磁电流储存在内存中,它们是主导偏转磁场的函数,与其一一对应。主导磁场每上升 10⁻⁴ T,相应的数据从内存中读出,并分别加在 DDS、电压幅度控制器以及偏磁电流源上。偏流源输出电流的误差或高频腔失振的角度,由加在末级功率放大管阴极的高频信号与板极信号之间的相位差经鉴相器给出的信号并通过一反馈环进行校正。另外,束流径向位置探测器给出的信号(ΔR)以及束团与高频间的相位差信号(Δφ)通过反馈环路对信号源 DDS 进行频率校正。

表 1 HIRFL-CSR 主环主要参数

Table 1 Main parameters of HIRFL-CSR main ring

参量	数值	参量	数值
周长(m)	161.20	重复周期(s,10 s 累积)	17
平均半径(m)	25.66	真空度(Pa)	6×10 ⁻⁹
最高能量(MeV/u)	900	离子能量(MeV/u)	8~50
最大磁刚度(Tm)	10.64	冷却电子能量(keV)	4.39~
最大磁感应强度(T)	1.4		27.43
磁场上升率(T/s)	约 0.4	冷却段长度(m)	4.0

表 2 主环高频加速系统主要参数

Table 2 RF accelerating parameters of main ring

参量	数值	参量	数值
频率范围(MHz)	0.25~1.7	高频谐波数	1
峰值电压(kV)	8.2	加速周期(ms)	3 000
安装高度(mm)	1 500	安装长度(m)	<2 600
腔体调谐精度(°)	<±5	束流孔径(mm)	200
铁氧体材料种类	HH600	铁氧体环尺寸(mm ³ ,外径×内径×厚度)	480×300×20
铁氧体环数目	80	初始磁导率(H/m)	600
电压稳定度(ΔV/V)	短期 ≤5×10 ⁻³ 长期 ≤5×10 ⁻²	电压精度	≤1×10 ⁻³

2 束流反馈原理

2.1 纵向相空间的相振荡

在整个同步加速过程中,高频频率必须严格与粒子回旋频率相等或者等于在中心轨道上的粒子的回旋频率的整数倍,且束团中心的相位与高频场的相位是固定的,否则,束团中心相位将随着时间变化而最终损失,即高频相位应与束流锁相。

为达到上述目的,主振荡器须有 2 个束流反馈环,1 个是束流径向位置 ΔR 反馈环,用于校正主振荡器的输出频率,另 1 个是束流相位 $\Delta\phi$ 反馈环,用于锁定相位(PLL)。

在高频场的作用下,储存环中的带电粒子,在能量与相位相空间做同步振荡,相运动方程由下式描述:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\Delta E}{\omega_0} \right) = \frac{\epsilon e V}{2\pi} (\sin \phi - \sin \phi_s) \\ \frac{d\phi}{dt} = -\frac{h\omega_0 \eta}{\beta_s^2} \frac{\Delta E}{E_s} \end{cases} \quad (1)$$

其中: $\Delta E = E - E_s$, E 为任意粒子的单核能, E_s 为同步粒子的单核能; ω_0 为同步粒子的回旋角频率; ϵ 为粒子的荷质比; e 是单位电荷电量; V 为高频场峰值电压; ϕ 为任意粒子的相位; ϕ_s 为同步粒子的相位; h 为高频谐波数; $\eta = 1/\gamma_s^2 - 1/\gamma_{tr}^2$, γ_{tr} 为机器的临界能量(转变能); β_s 、 γ_s 为同步粒子的相对论因子。

在束流反馈中,不处理单个粒子而将束团作为一个整体,即将束团的质心作为单个粒子进行处理,研究其在各种加速条件下是否稳定。下面的分析将忽略诸如空间电荷效应等所引起的相关振荡。

加速过程中,须满足下列关系:

$$V \sin \phi_s = 2\pi \rho R \dot{B} \quad (2)$$

其中: ρ 为偏转磁场中粒子中心轨道的曲率半径; R 为中心轨道在整个环中的平均半径; \dot{B} 为中心轨道磁场变化率。

高频电压 V 与磁场变化率 \dot{B} 的改变引起同步相位的变化为:

$$\Delta\phi_s = \tan \phi_s \left(\frac{\Delta \dot{B}}{B} - \frac{\Delta V}{V} \right) \quad (3)$$

通常, V 与 \dot{B} 在 1 个同步振荡周期内的变化非常小,它们所引起的 ϕ_s 的变化可以忽略,但二极磁场中纹波的高频成分很大,在分析中

应予以考虑。高频腔所产生的实际高频加速场与理想场在频率、相位与电压之间有一定差别,图 1 示出它们与束团中心之间的相对关系。在图 1 中,实际场与理想场间的相位差为 φ_0 , φ 为束团中心在实际场的相位,而 φ_b 定义为束团中心在理想场中的相位,由此可知:

$$\varphi_b = \varphi_0 + \varphi \quad (4)$$

上式对时间微分,得:

$$\frac{d\varphi_0}{dt} = \omega_R - \omega_1 = -\Delta\omega_{rf} \quad (5)$$

式中: $\Delta\omega_{rf}$ 为高频频率误差; ω_R 为实际高频场; ω_1 为理想高频场。

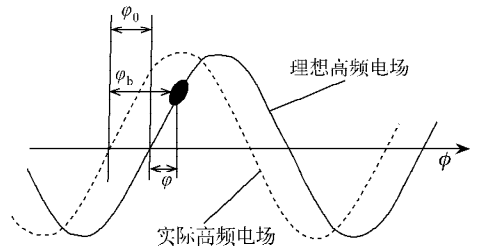


图 1 理想场与实际场关系示意图

Fig. 1 Relative relation of real and ideal RF field

用式(5)做线性处理,考虑到 ϕ_s 的变化为 $\Delta\phi_s$,则相运动方程(1)可写为:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\Delta E}{\omega_0} \right) = \frac{\epsilon e V}{2\pi} (\varphi - \phi_s - \Delta\phi_s) \cos \phi_s \\ \frac{d\varphi}{dt} = -\frac{h\omega_0 \eta}{\beta_s^2} \frac{\Delta E}{E_s} + \Delta\omega_{rf} \end{cases} \quad (6)$$

由上式可得:

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} + \Omega_s^2 \varphi = \Omega_s^2 \phi_s + \frac{d}{dt} (\Delta\omega_{rf}) \quad (7)$$

其中: Ω_s 为同步振荡频率,可表示为 $\Omega_s^2 = \frac{h\omega_0^2}{\beta_s^2 E_s}$.

$$|\eta| \frac{\epsilon e V}{2\pi} \cos \phi_s.$$

对 φ_b , 有:

$$\frac{d^2 \varphi_b}{dt^2} + \Omega_s^2 \varphi_b = \Omega_s^2 (\phi_s + \varphi_0) \quad (8)$$

利用式(4)和(5),并定义 $\Delta\phi_v = \varphi - \phi_s$, $\Delta\phi_u = \varphi_b - \phi_s$,可得到束团中心绕同步相位振荡方程为:

$$\begin{cases} \frac{d^2 \Delta\phi_v}{dt^2} + \Omega_s^2 \Delta\phi_v = -\dot{\varphi}_0 \\ \frac{d^2 \Delta\phi_u}{dt^2} + \Omega_s^2 \Delta\phi_u = \Omega_s^2 \varphi_0 \end{cases} \quad (9)$$

从上述方程可知,束团中心绕同步相位的振荡方程为外力是 φ_0 的受迫振荡,这里,假定 ϕ_s 为常数。

2.2 束流传输函数及束流反馈环路的要求

引进 Laplace 变换 $f(s) = \int_0^\infty f(t)e^{-st} dt$, 将微分方程变换为代数方程,方程(9)经变换得:

$$\begin{cases} \Delta\phi_v(s) = -\frac{s^2}{s^2 + \Omega_s^2} \varphi_0(s) \\ \Delta\phi_u(s) = \frac{\Omega_s^2}{s^2 + \Omega_s^2} \varphi_0(s) \end{cases} \quad (10)$$

上述方程即为束流的传输函数。将 $s = j\omega$ 代入式(10)可得下式:

$$\begin{cases} \frac{\Delta\phi_v(\omega)}{\varphi_0(\omega)} = -\frac{\omega^2}{\Omega_s^2 - \omega^2} \\ \frac{\Delta\phi_u(\omega)}{\varphi_0(\omega)} = \frac{\Omega_s^2}{\Omega_s^2 - \omega^2} \end{cases} \quad (11)$$

由上式可见,当 φ_0 包含同步振荡频率 Ω_s 分量时,相振荡幅度很快增长至无穷大,相对应粒子的动量分散 $\Delta p/p(s)$ 也将按指数形式增长。对于 CSR 主环,若所允许的平均径向轨道偏离 $\Delta R_{\max} = 5 \text{ mm}$,则频率偏差由 $\frac{\Delta\omega}{\omega_1} = \left(\frac{\gamma_{tr}^2}{\gamma^2} - 1\right) \frac{\Delta R}{R}$ 来估算,得 $|\Delta\omega/\omega_1| \leq 2.0 \times 10^{-5}$ 。其中,

$R = 26.66 \text{ m}$, $\gamma_{tr} = 4.76$,注入时(10 MeV/u), γ 约为 1。在运行时,考虑到偏转磁场的误差、电子学系统的噪声、稳定性、非线性,以及其它各种难以预料的因素,在高频控制系统中加束流反馈部分是非常必要的。

3 束流反馈环路分析

3.1 开环特性

式(6)经 Laplace 变换可给出加速过程中束流与高频场相互作用的内部模型(图 2)。束流反馈环路包括内部模型、束流位置反馈环、相位反馈环、主振荡器等。图 3 示出其模型图,并考虑到了噪声分量 $\Delta\omega_n$ 。束流位置反馈环的反馈电压由下式给出:

$$V_r = \Delta R N_r g_r \quad (12)$$

相位反馈环反馈电压为:

$$V_p = \Delta\phi_v G_d g_p \quad (13)$$

其中: ΔR 为束流位置探测器的输出信号; N_r

为 ΔR 的归一化系数(V/m); g_r 为控制器的增益; G_d 为相位探测器的灵敏度(V/rad); g_p 为相位环增益。

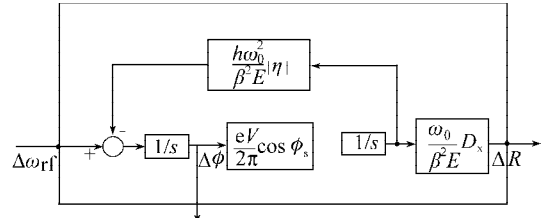


图 2 高频加速过程的内部模型

Fig. 2 Internal model of interaction of beam and RF field

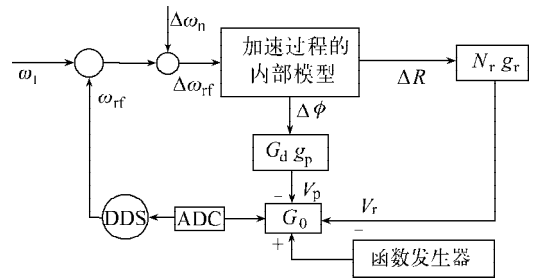


图 3 束流反馈模型

Fig. 3 Beam feedback model

加在内部模型输入端的频率误差为:

$$\Delta\omega_{rf} = G_0(-\Delta\phi_v G_d g_p - \Delta R N_r g_r) + \Delta\omega_n \quad (14)$$

当两个反馈环皆处于开环状态时,对方程(6)进行 Laplace 变换并考虑到束流闭轨与能散之间的关系,即 $\Delta R = D_x \frac{1}{\beta_s} \frac{\Delta E}{E}$, D_x 为色散函数,可得到如下关系:

$$\begin{cases} \frac{\Delta\phi_v}{\Delta\omega_{rf}} = \frac{s}{s^2 + \Omega_s^2} \\ \frac{\Delta R(s)}{\Delta\omega_{rf}} = \frac{1}{h\omega_0} \cdot \frac{D_x}{\eta} \cdot \frac{\Omega_s^2}{\Omega_s^2 + s^2} \end{cases} \quad (15)$$

可以看出,当 $\omega = \Omega_s$ 时,束团的相位移动以及相应的闭轨偏移将变成无穷大。对上述拉氏变换的反演可得到在时域内由于频率偏差 $\Delta\omega_{rf}$ 而引起的束流行为,即:

$$\frac{\Delta R(t)}{\Delta\omega_{rf}} = \frac{D_x}{h\omega_0 \eta} [1 - \cos(\Omega_s t)] \quad (16)$$

上式所示为一无阻尼振荡,其最大值 $\Delta R_{\max} = \frac{2\Delta\omega_{rf} D_x}{h\omega_0 \eta}$ 。由此可以计算出开环情况下

$\Delta R_{\max}/\Delta f_{rf}$ 随束流能量的变化。对于荷质比为 0.5、注入能量为 10 MeV/u、引出能量为 900 MeV/u 的粒子束,对应的磁感应强度分别为 0.12 和 1.38 T,同步振荡频率从 1 kHz 到几百 Hz,最大的闭轨偏移发生在注入时,为 41.1 mm/kHz。

3.2 闭环特性

当束流反馈环处于闭环状态时,输入频率偏差由式(14)给出。再利用束流加速过程的内部模型式(15),可得到如下束流传输函数:

$$\begin{cases} \Delta R(s) = \frac{CG_0 \Delta \omega_n}{s^2 + G_0 G_d g_p s + \Omega_s^2 + G_0 CN_r g_r} \\ \Delta \phi_v(s) = \frac{s \Delta \omega_n}{s^2 + G_0 G_d g_p s + \Omega_s^2 + G_0 CN_r g_r} \end{cases} \quad (17)$$

其中: $C = \frac{\Omega_s^2 D_x}{h \omega_0 \eta}$; 对于 HIRFL-CSR 主环,选择相位控制器增益为一常数,即 $g_p \equiv K_p$,径向控制器增益 $g_r(s) = K_r \frac{1 + T_{s0}s}{T_{s0}s}$, K_r 为一可变常数, $T_{s0} = \frac{1}{\Omega_{s0}}$, Ω_{s0} 为注入时同步相振荡频率。

传输函数式(17)则可写为:

$$\begin{cases} \frac{\Delta R(s)}{\Delta \omega_{rf}} = \frac{s \Omega_s^2}{s^3 + 2\zeta \Omega_{s0} s^2 + (1 + \kappa) \Omega_s^2 s + \Omega_s^2 \Omega_{s0} \kappa} \cdot \frac{D_x}{h \omega_0 \eta} \\ \frac{\Delta \phi_v(s)}{\Delta \omega_{rf}} = \frac{s^2}{s^3 + 2\zeta \Omega_{s0} s^2 + (1 + \kappa) \Omega_s^2 s + \Omega_s^2 \Omega_{s0} \kappa} \end{cases} \quad (18)$$

其中: $\zeta = G_0 G_d K_p / (2\Omega_{s0})$, $\kappa = G_0 G_r K_r D_x / (2\Omega_{s0} \eta)$ 。

欲使系统稳定,其特征方程 $s^3 + 2\zeta \Omega_{s0} s^2 + (1 + \kappa) \Omega_s^2 s + \Omega_s^2 \Omega_{s0} \kappa = 0$ 应满足条件 $\zeta > 0, \kappa > 0$ 以及 $\zeta > \frac{\kappa}{2(1 + \kappa)}$ 。若选择 $\zeta > 0.5$,对于任何 $\kappa > 0$,系统都将是稳定的。

根据加速过程中有关高频参数的变化^[2],计算出开环及闭环时的闭轨偏移,计算结果示于图 4。由图 4 可看出,在选择典型的环路参数 $\zeta = 0.6, K_r = 5 \times 10^{-3}$ 以及 $K_r = 5 \times 10^{-2}$ 后,在整个加速过程中,闭轨偏移 $\Delta R/\Delta f_{rf}$ 可保持在 2 mm/kHz 的范围内。

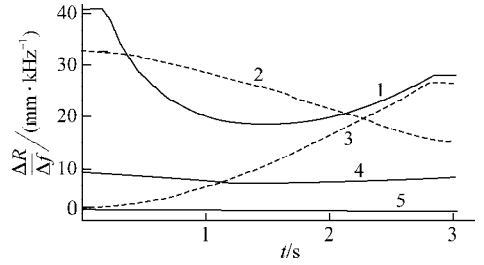


图 4 开环及闭环时闭轨偏移随时间的变化

Fig. 4 Closed orbit shift as a function of accelerating time

1——开环; 2—— Ω_s ; 3——主导偏转磁场;
4—— $\xi = 0.6, K_r = 5 \times 10^{-3}$; 5—— $\xi = 0.6, K_r = 5 \times 10^{-2}$

4 结论

用 Laplace 变换的方法从理论上分析了 HIRFL-CSR 主环束团中心在高频加速场作用下的动力学行为,并给出了相应的数值结果。通过使用束流径向位置反馈环和相位反馈环,并适当选择环路的反馈强度,可将束流闭合轨道因偏转磁场与高频频率不同步而造成的偏移压缩在可以接收的范围内。相位反馈环路的阻尼系数应选择正值,其范围在 0.61~1.0 之间,径向反馈环路的阻尼系数应尽可能地大,但以不引起环路的自激振荡和寄生振荡为原则。通过选择合适的参数,束流可得到稳定的加速。

参考文献:

- [1] ZHANG Wenzhi, XU Zhe, YANG Xiaodong, et al. RF accelerating system at HIRFL-CSR main ring[C]//Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference. Portland, USA: [s. n.], 2003: 1 288-1 290.
- [2] 张文志,陆晓文,徐向阳,等. HIRFL-CSR 束流加速过程模拟[J]. 原子能科学技术, 2000, 34(2): 142-145.
ZHANG Wenzhi, LU Xiaowen, XU Xiangyang, et al. Simulation of accelerating process in HIRFL-CSR[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2000, 34(2): 142-145(in Chinese).